中国生态农业学报 2016 年 7 月 第 24 卷 第 7 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jul. 2016, 24(7): 902−909

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.160245

红芸豆养分限制因子及养分吸收、积累和分配特征研究*

韩彦龙[1] 晋凡生[1**] 郑普山[2] 李晓平[3] 李 洁[1] 李海金[1]

(1. 山西省农业科学院旱地农业研究中心 太原 030031; 2. 山西省农业科学院农业环境与资源研究所 太原 030031; 3. 山西农业大学资源环境学院 太谷 030801)

摘 要 研究红芸豆养分限制因子、植株干物质和氮、磷、钾养分积累及分配规律，可为红芸豆合理施肥及高产栽培提供理论依据。大田试验条件下，以'英国红'红芸豆为试材，设置缺素试验，采集全施肥区植株样品，分析研究红芸豆不同生育时期各器官干物质量、养分含量及积累量。结果显示，氮磷钾配合全施显著提高红芸豆产量；缺氮、缺磷、缺钾处理与全施肥处理相比，产量分别降低 14.2%、8.0%和 11.3%，表明影响红芸豆产量的限制因子为氮>钾>磷。在整个生育期，红芸豆干物质累积速率先升高后降低；根、茎、荚皮和豆粒干物质累积量呈上升趋势，叶干物质在收获期有下降趋势，收获时不同部位干物质量为豆粒>茎≈荚皮>叶片>根。随生育期推进，茎、叶和荚皮中氮含量呈递减趋势，豆粒中氮含量呈递增趋势，而各器官磷、钾含量呈递减趋势。盛花期到结荚期是养分累积最大期，其氮、磷、钾吸收量分别占整个生育期吸收总量的 28.14%、49.22%和 56.20%；不同器官吸收累积氮、磷、钾量不同，成熟期豆粒、叶、茎和根中均为累积氮最多、钾次之、磷最少，荚皮中累积钾最多、氮次之、磷最少。每生产 100 kg 红芸豆需供给 N 4.37 kg、P_2O_5 2.38 kg、K_2O 3.53 kg，比例为 1∶0.54∶0.81。

关键词 红芸豆 养分限制因子 干物质 氮 磷 钾 养分累积
中图分类号: S513.01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)07-0902-08

Nutrient restrictive factors, nutrient absorption and accumulation of red kidney bean*

HAN Yanlong[1], JIN Fansheng[1**], ZHENG Pushan[2], LI Xiaoping[3], LI Jie[1], LI Haijin[1]

(1. Research Center for Dryland Agriculture, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China; 2. Institute of Agriculture Environment and Resource, Shanxi Academy of Agricultural Sciences, Taiyuan 030031, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract With important economical and nutritional values, kidney bean (*Phaseolus vuglaris*) is one of the main grain crops in China. Recently, the planting area of red kidney bean has been gradually increasing in Shanxi Province, China. However, the nutrient absorption characteristics and limiting factors of kidney bean was still not very clear. Nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) are essential nutrients for plant growth, and knowledge on periodic uptake, accumulation and allocation of N, P and K in different organs of kidney bean is important to implement nutrient management practices to ensure its' sustainable production. There were several studies on effect of the fertilization and nitrogen application on yield of kidney bean. However, few studies have investigated the nutrient accumulation and distribution characteristics of kidney bean. In this study, field experiment was conducted with different nutrient application (N absence, P absence, K absence, NPK application and no fertilizer) using the red kidney bean variety 'British Red' as the materials in 2014. The nutrient restrictive factors, dry matter accumulation and nutrient uptake and accumulation of red kidney bean were investigated. The samples of NPK

* 国家科技支撑计划项目(2014BAD07B05)资助
** 通讯作者: 晋凡生，主要从事农田土壤水分和农田生态研究。E-mail: jinfs@sina.com
韩彦龙，主要从事旱作节水及植物营养研究。E-mail: yanlonghan@126.com
收稿日期: 2016−03−15 接受日期: 2016−04−08
* Supported by the National Key Technology R&D Program of China (2014BAD07B05)
** Corresponding author, E-mail: jinfs@sina.com
Received Mar. 15, 2016; accepted Apr. 8, 2016

application treatment at different growth stages were collected for determining dry matter and nutrient contents in different organs, to illustrate the law of nutrient absorption. This is beneficial to provide theoretical basis for rational fertilization and high yield cultivation of red kidney bean. The results showed that NPK application treatment significantly increased yield of red kidney bean compared to absence of N, P, or K and no fertilizer treatments. Compared to NPK application treatment, yields of N-, P- or K-absence decreased by 14.2%, 8.0% and 11.3%, respectively, which indicated that the order of nutrient restrictive factors of red kidney bean yield was N > K > P. The dry matter accumulation rate of red kidney bean increased firstly and then reduced in the whole growth period. Dry matter accumulation of root, stem, pod shell and pea increased gradually throughout the whole growing period, while dry matter accumulation of leaf decreased at harvest stage. The order of dry matter weight in different organs at harvest was pea > stem ≈ pod shell > leaf > root. The contents of N, P and K of all investigated organs varied at different stages. N contents in steam, leaf and pod shell decreased gradually, and increased in pea throughout the whole period. The contents of P and K in different organs showed a decreasing trend in whole growth period. The highest nutrients level was observed from full-blooming to pod bearing stage, in which, the absorption contents of N, P and K accounted for 28.14%, 49.22% and 56.20% of the total content of whole growth period, respectively. The accumulation amount of N, P and K in different organs was various. The order of N, P, K accumulation was N > K > P in pods, leaves, stalks and stems, while it was order of K > N > P in pod skins. In conclusion, to produce 100 kilogram kidney bean pea, 4.37 kg N, 2.38 kg P_2O_5 and 3.53 kg K_2O application with ratio of 1∶0.54∶0.81 were needed.

Keywords　Red kidney bean; Nutrient restrictive factor; Dry matter; N; P; K; Nutrient accumulation

芸豆(*Phaseolus vuglaris*)是我国的一种主要杂粮作物，主要分布在北方和西南高寒冷凉地区，种植面积较广[1]，其中山西省是我国芸豆主产地之一。氮、磷、钾是植物生长的必需营养元素，其吸收利用直接影响作物的生长发育及产量，了解作物养分吸收累积规律可以有效调控其生长发育，提高产量，改善品质。已有研究表明，作物对氮、磷、钾养分吸收利用因作物种类、品种、产量和施肥量不同而有差异[2–6]。合理密植、增施氮、磷肥并配合钾肥能显著提高芸豆产量[7–8]；芸豆因氮肥种类不同增产效果不同、氮肥利用率及吸氮量因品种而异[9]；施用氮肥显著增加红芸豆荚数、提高百粒重、改善品质[10–12]。这些研究主要集中在施肥及氮肥对芸豆产量和农艺性状的影响，而关于芸豆的养分限制因子及养分吸收、累积、分配特征的研究尚鲜见报道。红芸豆是芸豆的一种，因其营养价值和经济价值较高，近年来在山西的种植面积逐步增加[13]。本文以红芸豆为试材，根据农民习惯施肥结合土壤测定结果确定施肥量，设置氮、磷、钾缺素试验，明确红芸豆养分限制因子；在氮、磷、钾全施处理区采集不同生育期的植株样品，系统研究红芸豆干物质积累、氮、磷和钾含量及养分吸收累积分配特征，以期为红芸豆合理施肥及高产栽培提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验于 2014 年在山西省农业科学院旱地农业研究中心阳曲县旱作节水基地试验田进行。该基地地处忻州与晋中盆地之脊梁地带，属温暖带大陆性季风气候，四季分明，年平均气温 6~7 ℃，降雨量为 441.2 mm，无霜期为 120 d 左右。土壤为褐土性土，0~20 cm 土壤有机质 14.41 $g\cdot kg^{-1}$，全氮 0.95 $g\cdot kg^{-1}$，碱解氮 40.4 $mg\cdot kg^{-1}$，速效磷 17.05 $mg\cdot kg^{-1}$，速效钾 107.12 $mg\cdot kg^{-1}$，pH 8.25。

1.2　试验设计

本试验设CK(不施肥)、PK(缺N，施P_2O_5 120 $kg\cdot hm^{-2}$、K_2O 100 $kg\cdot hm^{-2}$)、NK(缺P，施N 90 $kg\cdot hm^{-2}$、K_2O 100 $kg\cdot hm^{-2}$)、NP(缺K，施N 90 $kg\cdot hm^{-2}$、P_2O_5 120 $kg\cdot hm^{-2}$)及NPK(全施肥处理，施N 90 $kg\cdot hm^{-2}$、P_2O_5 120 $kg\cdot hm^{-2}$、K_2O 100 $kg\cdot hm^{-2}$)共5个处理，3次重复，随机区组排列，小区面积28 m^2，其中氮、磷、钾肥用量由农民习惯施肥结合土壤测定结果而定。供试红芸豆品种为'英国红'，每穴双株留苗，密度为11万株$\cdot hm^{-2}$，全部肥料采用春季一次性基施。4月30日播种，8月26日收获；按小区单独收获，脱粒，计量产量。

植株样品采集：分别于苗期(6月14日)、现蕾期(7月1日)、盛花期(7月19日)、结荚期(8月8日)和成熟期(8月26日)进行整株取样，在各小区选取10株地上部长势一致的植株，称取鲜重，分为根、茎、叶、荚皮、豆粒等部位，清洗，然后在烘箱中105 ℃杀青30 min，60~70 ℃烘干，称量干重。

1.3　项目及测定方法

植株样品全氮用浓H_2SO_4消解，FOSS 8400型全自动定氮仪凯氏定氮法测定；全磷、全钾采用HNO_3-$HClO_4$消解，普析通用TU-1901型紫外分光光度计钒钼黄比色法测定全磷，6400A型火焰光度计火焰光度法测定全钾[14]。

1.4 数据统计分析

采用Microsoft Excel 2007和SPSS 15软件进行数据统计与分析。

2 结果与分析

2.1 红芸豆养分限制因子研究

从表1可以看出，与CK处理相比，施肥可不同程度地提高红芸豆产量，增幅为13.4%~32.2%，其中NPK配施处理产量显著高于其他处理；缺施氮肥与缺施磷、钾肥处理间差异显著，缺施磷肥与缺施钾肥处理间差异不显著。若以NPK处理产量为最佳产量，其他处理与其的比值计算相对产量，可以看出，缺施氮、磷、钾肥处理分别减产14.2%、8.0%和11.3%，说明本试验条件下影响红芸豆产量的养分限制因素氮>钾>磷。从产量构成因素来看，NPK配施显著提高百粒重4.99~6.11 g，缺施氮、磷、钾肥及不施肥处理间百粒重差异不显著；NPK配施处理红芸豆荚数显著增加0.93~2.4个，缺施氮肥与不施肥处理荚数无显著性差异，但显著低于缺施磷、钾肥处理，这进一步说明氮、磷、钾肥主要通过影响豆荚数量而影响其产量。

表1 不同肥料配施对红芸豆产量及产量构成因素的影响

Table 1 Effects of different fertilizer applications on the yield and yield components of red kidney bean

处理 Treatment	豆荚数 Pod number	百粒重 100-grain weight (g)	平均产量 Average yield ($kg\cdot hm^{-2}$)	相对产量 Relative yield (%)
NPK	8.83±0.76a	53.04±1.32a	2 634.6±36.7a	100.0
PK	6.57±0.47c	47.47±0.67b	2 261.8±44.6c	85.8
NK	7.10±0.36b	46.93±0.64b	2 425.0±107.8b	92.0
NP	7.90±0.26b	48.05±1.13b	2 338.1±78.8bc	88.7
CK	6.43±0.35c	47.96±1.32b	1 993.2±62.5d	75.6

CK：不施肥；PK：缺N，施P_2O_5 120 $kg\cdot hm^{-2}$、K_2O 100 $kg\cdot hm^{-2}$；NK：缺P，施N 90 $kg\cdot hm^{-2}$、K_2O 100 $kg\cdot hm^{-2}$；NP：缺K，施N 90 $kg\cdot hm^{-2}$、P_2O_5 120 $kg\cdot hm^{-2}$；NPK：平衡施肥处理，施N 90 $kg\cdot hm^{-2}$、P_2O_5 120 $kg\cdot hm^{-2}$、K_2O 100 $kg\cdot hm^{-2}$。同列数据后不同字母表示差异达5%显著水平。CK: application rate of fertilizer was 0 $kg\cdot hm^{-2}$. PK: application rates of nitrogen, phosphorus (P_2O_5) and potassium (K_2O) were 0 $kg\cdot hm^{-2}$, 120 $kg\cdot hm^{-2}$ and 100 $kg\cdot hm^{-2}$, respectively. NK: application rates of nitrogen, phosphorus (P_2O_5) and potassium (K_2O) were 90 $kg\cdot hm^{-2}$, 0 $kg\cdot hm^{-2}$ and 100 $kg\cdot hm^{-2}$, respectively. NP: application rates of nitrogen, phosphorus (P_2O_5) and potassium (K_2O) were 90 $kg\cdot hm^{-2}$, 120 $kg\cdot hm^{-2}$ and 0 $kg\cdot hm^{-2}$, respectively. NPK: application rates of nitrogen, phosphorus (P_2O_5) and potassium (K_2O) were 90 $kg\cdot hm^{-2}$, 120 $kg\cdot hm^{-2}$ and 100 $kg\cdot hm^{-2}$, respectively. Different letters in the same column mean significant difference at 5% level.

2.2 红芸豆干物质积累与分配

由表2和表3可以看出，红芸豆不同生育期干物质累积量差异显著，呈先升高再降低的变化趋势，表现为结荚期>盛花期>成熟期>现蕾期>苗期；全生育期单株干物质积累出现两次高峰，第1次出现在现蕾期至盛花期，第2次出现在盛花期至结荚期，分别占总量的24.25%和46.22%。各个生育阶段红芸豆干物质累积速率有明显差异，单株日积累量苗期最低，为0.03 g；盛花期到结荚期最高，为1.30 g；全生育期平均0.75 g。苗期到盛花期叶片是累积干物质的主体，占整株的52.4%~65.5%；结荚期以后，豆粒成为干物质累积的主体，占总干重的36.1%~45.7%，收获时单株干物质量为56.49 g，豆粒产量为25.84 g。

从各器官生长情况看，根干物质量在盛花期达到最大，此后趋于平缓；茎干物质量在结荚期达到最高，后期生长平缓；叶干物质量不同阶段差异显著，在盛花期达到最高，随后逐渐降低，收获时降到最低，其中可能与生长后期植株下部叶片枯萎脱落未能及时收集有关。从结荚期到成熟期，荚皮干物质量变化趋于平缓，豆粒干物质量显著增加，成为干物质分配的主体。收获时不同器官干物质积累量表现为豆粒>茎≈荚皮>叶片>根。

2.3 红芸豆植株生育期氮、磷、钾含量变化规律

从植株氮含量来看(表4)，不同生育阶段红芸豆根系含氮量差异显著，从苗期到结荚期逐渐降低，成熟期又有回升，达10.21 $g\cdot kg^{-1}$，这可能与氮在成熟期的回流有关；茎含氮量从苗期到现蕾期先升高，然后逐渐降低；叶片含氮量随生育期推进逐渐降低，各生育期之间差异显著，收获时降至最低值(9.12 $g\cdot kg^{-1}$)。荚皮含氮量呈降低趋势，而豆粒含氮量呈升高趋势，收获时豆粒含氮29.5 $g\cdot kg^{-1}$，因此适当晚收可以提高红芸豆籽粒中氮含量。

从植株磷含量来看：随生育期推进，根系含磷量呈倒“S”型变化，苗期最高，然后逐渐降低，到结荚期又升高到与苗期相同的水平，然后显著降低，成熟期降到最低(2.25 $g\cdot kg^{-1}$)；茎含磷量逐渐降低，结荚期开始趋于稳定，收获时含磷量为2.56 $g\cdot kg^{-1}$；叶片含磷量逐渐降低，盛花期开始趋于稳定；荚皮和豆粒的含磷量变化平稳，收获时豆粒磷含量为7.13 $g\cdot kg^{-1}$。

表 2　不同生育期红芸豆干物质累积与分配

Table 2　Dry matter accumulation and distribution in red kidney bean at different growth stages

器官 Plant organ	干物质累积量 Dry matter accumulation amount (g·plant^{-1})				
	苗期 Seedling stage	现蕾期 Squaring stage	盛花期 Full-bloom stage	结荚期 Pod bearing stage	成熟期 Mature stage
根 Root	0.18±0.05c	0.61±0.06b	1.37±0.12a	1.26±0.11a	1.34±0.17a
茎 Stem	0.30±0.01d	2.35±0.20c	8.84±0.79b	10.59±0.61a	11.42±0.59a
叶 Leaf	0.90±0.08e	4.66±0.76d	11.26±0.49a	7.92±0.85b	6.09±0.67c
荚皮 Pod shell	—	—	—	10.61±0.68a	11.80±0.47a
豆粒 Pea	—	—	—	17.20±0.86b	25.84±0.41a
整株 Total plant	1.38±0.14e	7.77±0.50d	21.47±0.31c	47.58±0.52b	56.49±1.25a
器官 Plant organ	干物质分配比例 Dry matter distribution rate (%)				
	苗期 Seedling stage	现蕾期 Squaring stage	盛花期 Full-bloom stage	结荚期 Pod bearing stage	成熟期 Mature stage
根 Root	12.8	7.9	6.4	2.7	2.4
茎 Stem	21.7	32.1	41.2	22.3	20.2
叶 Leaf	65.5	60.0	52.4	16.7	10.8
荚皮 Pod shell	—	—	—	22.3	20.9
豆粒 Pea	—	—	—	36.1	45.7
整株 Total plant	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

同行数值后不同字母表示差异达 5%显著水平，下同。Different letters in the same row mean significant difference at 5% level. The same below.

表 3　红芸豆植株不同生育期干物质累积量及累积速率

Table 3　Dry matter accumulation amounts and rates of red kidney bean at different growth stages

项目 Item	苗期 Seedling stage	苗期—现蕾期 Seedling–squaring stage	现蕾期—盛花期 Squaring–full bloom stage	盛花期—结荚期 Full bloom–pod bearing stage	结荚期—成熟期 Pod bearing–maturity stage	总计 Total
干物质累积量 Dry matter accumulation amount (g·plant^{-1})	1.38±0.14	6.39±0.41	13.70±0.36	26.11±0.82	8.91±0.79	56.49±1.25
占总量比例 Percentage of total (%)	2.44±0.25	11.31±0.82	24.25±0.73	46.22±1.02	15.78±1.52	100.00
累积速率 Accumulation rate (g·plant^{-1}·d^{-1})	0.03±0.00	0.38±0.02	0.69±0.02	1.30±0.04	0.49±0.04	0.75±0.01

表 4　不同生育期红芸豆不同部位氮、磷、钾含量

Table 4　Contents of N, P and K in different organs of red kidney bean at different growth stages　　g·kg^{-1}

养分 Nutrient	器官 Plant organ	苗期 Seedling stage	现蕾期 Squaring stage	盛花期 Full-bloom stage	结荚期 Pod bearing stage	成熟期 Mature stage
N	根 Root	20.75±0.82a	16.40±0.52b	14.03±0.91c	7.49±0.67e	10.21±0.29d
	茎 Stem	24.45±1.02b	28.51±0.67a	20.38±1.18c	11.60±0.64d	9.12±1.00e
	叶 Leaf	43.03±1.28a	41.73±1.17a	29.53±0.94b	24.15±0.71c	18.17±0.66d
	荚皮 Pod shell	—	—	—	14.39±0.59a	6.39±0.69b
	豆粒 Pea	—	—	—	26.00±0.83a	29.50±1.28b
P	根 Root	5.55±0.32a	2.92±0.57b	3.54±0.27b	5.02±0.66a	2.25±0.53b
	茎 Stem	5.11±0.35a	5.14±0.88a	4.36±0.72a	2.84±0.64b	2.56±0.50b
	叶 Leaf	8.72±0.48a	6.68±0.62b	4.71±0.82c	5.07±0.72ab	4.74±0.63c
	荚皮 Pod shell	—	—	—	2.51±0.42a	1.87±0.09a
	豆粒 Pea	—	—	—	7.26±0.72a	7.13±0.60a
K	根 Root	17.81±0.55a	15.35±0.60b	7.77±0.61c	4.94±0.46e	6.18±0.41d
	茎 Stem	30.90±0.43a	26.38±0.90b	15.17±0.65c	10.01±0.47d	7.12±0.54e
	叶 Leaf	19.46±0.57a	17.22±0.26b	12.11±0.35c	10.89±0.14d	6.84±0.39c
	荚皮 Pod shell	—	—	—	22.83±0.57a	20.74±0.97b
	豆粒 Pea	—	—	—	15.51±0.59a	14.85±0.46a

从植株钾含量来看：随生育期推进，根含钾量变化趋势和含氮量一致；不同生育期茎和叶片含钾量呈显著下降趋势，收获时茎含钾量为7.12 $g\cdot kg^{-1}$，叶为6.84 $g\cdot kg^{-1}$；荚皮含钾量呈降低趋势，而豆粒中的钾含量变化平稳，收获时豆粒中含钾14.85 $g\cdot kg^{-1}$。

综上所述，同一器官中不同养分含量不同，根、茎、叶片及豆粒中氮>钾>磷，荚皮中钾>氮>磷。不同生育期，植株各器官中氮、磷、钾养分含量变化较大。在成熟期各器官中氮含量依次为豆粒>叶>茎>根>荚皮，磷含量依次为豆粒>叶>茎>根>荚皮，钾含量依次为荚皮>豆粒>茎>叶>根。

2.4 红芸豆不同生育期植株养分吸收、累积及分配特点

2.4.1 红芸豆不同生育期植株养分吸收特点

由表5可知，随生育期推进，红芸豆植株氮、磷、钾的吸收量逐渐增加，到收获期各养分吸收量达到最大，不同养分累积量表现为氮>钾>磷，平均单位面积吸收累积N 124.39 $kg\cdot hm^{-2}$、P 28.86 $kg\cdot hm^{-2}$、K 83.56 $kg\cdot hm^{-2}$，比例为4.31∶1∶2.89。结合表3可以看出盛花期到结荚期是红芸豆群体最大时期，也是氮、磷、钾养分累积最多的时期，即养分需求最大期，氮、磷、钾的吸收量分别占全生育期吸收总量的28.14%、49.22%和56.20%。从吸收速率来看，生育前期因植株较小，氮、磷、钾吸收速率较低，盛花期到结荚期最大，后期降低。因此，红芸豆进入花期应保证养分的充足供应。

2.4.2 氮、磷、钾养分累积量及分配特点

由表6~8可知，随生育期推进，红芸豆植株氮、磷、钾累积量呈递增的趋势。从苗期到盛花期叶是氮、磷、钾养分的分配中心，从结荚期开始豆粒成为养分的分配中心；成熟期豆粒、叶片、茎和根中累积氮最多、钾次之、磷最少，荚皮中累积钾最多，氮次之，磷最少。

表5 红芸豆植株不同生育期养分累积量及吸收速率

Table 5 Nutrient accumulation and uptake rates of red kidney bean at different growth stages

养分 Nutrient	项目 Item	苗期 Seedling stage	苗期—现蕾期 Seedling–squaring stage	现蕾期—盛花期 Squaring–full bloom stage	盛花期—结荚期 Full bloom–pod bearing stage	结荚期—成熟期 Pod bearing–maturity stage	总计 Total
N	吸收量 Uptake amount ($kg\cdot hm^{-2}$)	5.48±0.28d	24.07±1.65c	28.86±1.46b	35.00±1.58a	30.97±2.25d	124.39±1.83
	占总量比例 Percentage of total (%)	4.40±0.20	19.36±1.52	23.20±1.02	28.14±1.33	24.89±1.52	100.00
	吸收速率 Uptake rate ($kg\cdot hm^{-2}\cdot d^{-1}$)	0.11±0.01c	1.42±0.09b	1.44±0.07b	1.75±0.08a	1.72±0.12a	1.66±0.02
P	吸收量 Uptake amount ($kg\cdot hm^{-2}$)	1.12±0.03d	3.75±0.11c	6.01±0.45b	14.27±0.87a	3.70±0.54c	28.86±0.67c
	占总量比例 Percentage of total (%)	3.90±0.08	13.02±0.61	20.80±1.13	49.22±2.04	12.86±2.17	100.00
	吸收速率 Uptake rate ($kg\cdot hm^{-2}\cdot d^{-1}$)	0.02±0.00d	0.22±0.01c	0.30±0.02b	0.71±0.04a	0.21±0.03c	0.38±0.01
K	吸收量 Uptake amount ($kg\cdot hm^{-2}$)	3.29±0.03d	13.48±0.78b	14.09±1.51b	46.92±1.91a	5.78±2.85c	83.56±1.75
	占总量比例 Percentage of total (%)	3.94±0.12	16.14±1.26	16.84±1.47	56.20±3.46	6.88±0.99	100.00
	吸收速率 Uptake rate ($kg\cdot hm^{-2}\cdot d^{-1}$)	0.06±0.00d	0.79±0.05b	0.70±0.08b	2.35±0.09a	0.32±0.05c	1.11±0.02c

从氮累积量来看(表6)，根、茎、叶中氮累积量呈先升高后下降趋势，盛花期最大；荚皮中的氮累积量呈递减趋势，豆粒中的氮累积量呈增加趋势；收获时每公顷豆粒累积氮 83.91 kg，各器官氮累积量依次为豆粒>叶片>茎>荚皮>根。从分配比例来看，随生育期推进，氮在根、叶片中的分配比例逐渐降低；在茎中分配比例先升高后降低，盛花期最高，为33.82%；后期氮主要分配在豆粒中，收获时根、茎、叶、荚皮、豆粒中氮的分配比例分别为1.20%、11.70%、12.99%、6.66%和67.45%。

从磷累积量来看(表7)，根、茎、叶片中磷累积量呈先升高后下降趋势，根中磷的累积量在结荚期最大，茎和叶片中磷的积累在盛花期最大，荚皮中的磷累积量变化不明显，而豆粒中磷的累积量呈增加趋势；收获时期每公顷豆粒吸收累积磷19.73 kg，各器官磷累积量依次为豆粒>茎≈叶片>荚皮>根。从分配比例来看，随生育期推进，磷在叶中的分配比例逐渐降低；在根、茎中分配比例先升高后降低，盛花期最高，分别达4.87%和43.94%；后期磷主要分配在豆粒中，收获时根、茎、叶片、荚皮、豆粒中磷的分配比例分别为1.14%、11.07%、10.93%、8.40%和68.46%。

从钾累积量来看(表8)，随生育期推进，根、茎、叶片中钾累积量呈先升高后下降趋势，盛花期达最大；荚皮中的钾累积量无显著变化，豆粒中的钾累积量呈递增趋势；成熟期每公顷豆粒吸收累积钾

表 6　红芸豆不同生育期各器官氮的累积与分配

Table 6　Nitrogen accumulation and distribution in red kidney bean at different growth stages

器官 Plant organ	氮累积量 N accumulation amount (kg·hm^{-2})				
	苗期 Seedling stage	现蕾期 Squaring stage	盛花期 Full-bloom stage	结荚期 Pod bearing stage	成熟期 Mature stage
根 Root	0.40±0.10d	1.11±0.08c	2.11±0.07a	1.03±0.01c	1.50±0.16b
茎 Stem	0.80±0.01e	7.84±1.48d	19.76±1.22a	10.68±0.93c	14.56±0.48b
叶 Leaf	4.27±0.27d	20.60±1.65b	36.50±1.25a	15.80±1.17c	16.14±1.43c
荚皮 Pod shell	—	—	—	16.77±0.45a	8.28±0.67b
豆粒 Pea	—	—	—	49.15±1.59b	83.91±2.32a
整株 Total plant	5.47±0.28e	29.55±1.79d	58.41±0.36c	93.41±1.23b	124.40±1.83a
器官 Plant organ	氮分配比例 N distribution rate (%)				
	苗期 Seedling stage	现蕾期 Squaring stage	盛花期 Full-bloom stage	结荚期 Pod bearing stage	成熟期 Mature stage
根 Root	7.32	3.76	3.62	1.10	1.20
茎 Stem	14.62	26.53	33.82	11.43	11.70
叶 Leaf	78.06	69.71	62.56	16.91	12.99
荚皮 Pod shell	—	—	—	17.95	6.66
豆粒 Pea	—	—	—	52.61	67.45
整株 Total plant	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

表 7　红芸豆不同生育期各器官磷的累积与分配

Table 7　Phosphorous accumulation and distribution in red kidney bean at different growth stages

器官 Plant organ	磷累积量 P accumulation amount (kg·hm^{-2})				
	苗期 Seedling stage	现蕾期 Squaring stage	盛花期 Full-bloom stage	结荚期 Pod bearing stage	成熟期 Mature stage
根 Root	0.11±0.02e	0.19±0.03d	0.53±0.03b	0.69±0.06a	0.33±0.06c
茎 Stem	0.17±0.01d	1.38±0.04c	4.78±0.40a	3.28±0.53b	3.19±0.46b
叶 Leaf	0.86±0.04d	3.28±0.04c	5.57±0.34a	4.46±0.39b	3.15±0.18c
荚皮 Pod shell	—	—	—	3.02±0.16a	2.42±0.07b
豆粒 Pea	—	—	—	13.72±1.23b	19.73±0.88a
整株 Total plant	1.14±0.03e	4.85±0.12d	10.88±0.37c	25.17±1.17b	28.82±0.67a
器官 Plant organ	磷分配比例 P distribution rate (%)				
	苗期 Seedling stage	现蕾期 Squaring stage	盛花期 Full-bloom stage	结荚期 Pod bearing stage	成熟期 Mature stage
根 Root	9.65	3.92	4.87	2.74	1.14
茎 Stem	14.91	28.45	43.94	13.03	11.07
叶 Leaf	75.44	67.63	51.19	17.72	10.93
荚皮 Pod shell	—	—	—	12.00	8.40
豆粒 Pea	—	—	—	54.51	68.46
整株 Total plant	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

42.22 kg，各器官中钾累积量依次为豆粒>荚皮>茎>叶片>根。从分配比例来看，钾在根、叶中的分配比例逐渐降低，在茎中分配比例先升高后下降，盛花期最高，占47.67%；后期钾主要分配在豆粒和荚皮中，收获时根、茎、叶片、荚皮、豆粒中钾的分配比例为1.09%、10.71%、5.49%、32.18%和50.53%。

由成熟期地上部植株吸收氮、磷、钾量计算可得，每生产 100 kg 红芸豆需供给纯 N 4.37 kg、P_2O_5 2.38 kg、K_2O 3.53 kg，比例为 1∶0.54∶0.81。

3　讨论

大量研究表明氮、磷、钾是影响作物生长的主要因子，其中氮素是影响作物生长发育的第一养分限制因子[2–6]。李俊华等[8]研究表明肥料对红芸豆的影响程度为氮肥>磷肥>钾肥；高运青等[15]认为影响芸豆产量的施肥因素施氮>施钾>施磷；畅建武等[11]

表 8 红芸豆不同生育期各器官钾的累积与分配

Table 8 Potassium accumulation and distribution in red kidney bean at different growth stages

器官 Plant organ	钾累积量 K accumulation amount (kg·hm^{-2})				
	苗期 Seedling stage	现蕾期 Squaring stage	盛花期 Full-bloom stage	结荚期 Pod bearing stage	成熟期 Mature stage
根 Root	0.34±0.09d	1.04±0.12ab	1.17±0.04a	0.68±0.04c	0.91±0.08b
茎 Stem	1.02±0.06e	7.22±1.09d	14.71±0.88a	11.68±1.20b	8.95±0.87c
叶 Leaf	1.93±0.14d	5.80±0.53b	14.98±0.22a	9.47±0.90b	4.59±0.65c
荚皮 Pod shell	—	—	—	26.62±1.11a	26.89±0.40a
豆粒 Pea	—	—	—	29.32±0.89b	42.22±0.96a
整株 Total plant	3.29±0.03e	16.77±0.81d	30.86±0.78c	77.78±1.13b	83.56±1.75a

器官 Plant organ	钾分配比例 K distribution rate (%)				
	苗期 Seedling stage	现蕾期 Squaring stage	盛花期 Full-bloom stage	结荚期 Pod bearing stage	成熟期 Mature stage
根 Root	10.34	6.20	3.79	0.87	1.09
茎 Stem	31.00	43.06	47.67	15.02	10.71
叶 Leaf	58.66	50.74	48.54	12.18	5.49
荚皮 Pod shell	—	—	—	34.24	32.18
豆粒 Pea	—	—	—	37.69	50.53
整株 Total plant	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

认为氮、磷是影响红芸豆生长及产量的主要影响因素。前人的研究结果显示磷、钾对红芸豆产量影响顺序不同，这可能因试验土壤类型、土壤基础养分及施肥量不同所致。本试验条件下，与氮磷钾全施处理相比，不施氮(减产14.2%)和不施钾肥(减产11.3%)减产效果显著，结合产量和氮、磷、钾累积趋势，初步确定氮、钾对红芸豆产量限制影响大于磷。

本研究表明，红芸豆干物质量积累呈先升高后下降趋势，与大豆(*Glycine max*)[16−17]、红小豆(*Vigna umbellata*)[18]的干物质积累趋势相同，各个生育阶段红芸豆干物质累积速率有明显差异，单株日积累量苗期最低，为0.03 g，在盛花期到结荚期最高，为1.30 g，其余阶段干物质积累缓慢，说明盛花期到结荚期是干物质快速积累时期，此期需供应充足的养分。盛花前，植株干物质主要在根、叶片和茎中迅速积累，以后根、茎的累积量逐渐下降，这可能是根、茎贮藏的营养物质向籽粒逐步转运之故；盛花期后叶片干物质累积量急剧下降，可能与是红芸豆生育后期因部分叶片枯萎、脱落有关，建议在今后的研究中应考虑叶片的脱落。

作物生物量的累积量与养分的积累量有着密切的关系，养分吸收、积累是生物量累积和作物产量形成的基础，也是合理施肥的重要依据。本研究表明红芸豆生物量累积趋势和氮、磷、钾养分累积曲线基本一致，这与宋海星等[19]对玉米的研究相一致，盛花期到结荚期是红芸豆生殖生长和营养生长并进的时期，此阶段干物质积累大，占总生育期整体的46.22%，氮、磷、钾养分吸收速率和养分积累最大，分别占总吸收量的28.14%、49.22%和56.20%；此外，红芸豆在现蕾期到盛花期的养分需求也较高，与红小豆[18]的养分需求结果相似。根据红芸豆干物质积累和养分吸收特点，要获得红芸豆的高产，需合理施肥，实现红芸豆苗期壮苗，在开花前期适当追施氮、钾肥，保证土壤养分供应充足，以满足红芸豆养分吸收和干物质积累的需求。红芸豆是豆科作物，氮素营养比较复杂，氮肥用量需考虑固氮因素。宋谨同等[9]研究表明最佳施氮量与芸豆的品种有关。本试验只研究了平衡施肥条件下红芸豆养分吸收状况，有关红芸豆的最佳施肥量以及不同施肥情况下红芸豆养分吸收状况，还需开展进一步试验。

4 结论

1)氮、磷、钾配合施用显著提高红芸豆产量，增加红芸豆百粒重和有效荚数。缺施氮、磷、钾肥平均减产14.2%、8.0%和11.3%，影响红芸豆产量的养分限制因子氮>钾>磷。

2)红芸豆干物质累积在整个生育期内先增加后减少，全生育期单株干物质积累在现蕾期至盛花期、盛花期至结荚期出现两次高峰，分别占红芸豆植株总干重的24.25%和46.22%。苗期至盛花期以生长茎叶为主，结荚期以后，豆粒成为红芸豆干物质累积的主体，占植株总干重的36.1%~45.7%，收获

时单株豆粒产量为25.84 g。

3)红芸豆根茎叶各器官不同生育期氮、磷、钾养分含量随生育期推进逐渐降低; 氮、磷、钾积累趋势相同, 累积量氮>钾>磷, 盛花期到结荚期是养分累积最大期; 不同器官养分累积量不同, 成熟期豆粒、叶、茎和根中累积氮最多、钾次之、磷最少, 荚皮中累积钾最多, 氮次之, 磷最少。每生产100 kg红芸豆需供给N 4.37 kg、P_2O_5 2.38 kg、K_2O 3.53 kg, 比例为1∶0.54∶0.81。

参考文献　References

[1] 柴岩, 万富世. 中国小杂粮产业发展报告[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007: 84–90
Chai Y, Wan F S. Minor Cereal Industry Development Report of China[M]. Beijing: Agricultural Science and Technology Press of China, 2007: 84–90

[2] 王宜伦, 李潮海, 何萍, 等. 超高产夏玉米养分限制因子及养分吸收积累规律研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3): 559–566
Wang Y L, Li C H, He P, et al. Nutrient restrictive factors and accumulation of super-high-yield summer maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2010, 16(3): 559–566

[3] Nyiraneza J, N' Dayegamiye A, Chantigny M H, et al. Variations in corn yield and nitrogen uptake in relation to soil attributes and nitrogen availability indices[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(1): 317–327

[4] 赵瑞芬, 陈明昌, 张强, 等. 山西省褐土土壤养分限制因子研究[J]. 山西农业科学, 2003, 31(3): 35–39
Zhao R F, Chen M C, Zhang Q, et al. Study on the soil nutrients limiting-factors in the cinnamon soil of Shanxi[J] Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2003, 31(3): 35–39

[5] 戴良香, 张电学, 郝兰春, 等. 高产粮区冬小麦–夏玉米轮作条件下土壤养分限制因子与施肥研究[J]. 河北职业技术师范学院学报, 2001, 15(2): 5–8
Dai L X, Zhang D X, Hao L C, et al. Study on soil nutrient factors and fertilization in high yield fields practicing rotation of winter wheat and summer corn[J]. Journal of Hebei Vocation-Technical Teachers College, 2001, 15(2): 5–8

[6] 李玉影, 刘双全, 姬景红, 等. 黑龙江省不同农业生态区大豆平衡施肥效果研究[J]. 大豆科学, 2015, 34(6): 1029–1038
Li Y Y, Liu S Q, Ji J H, et al. Study on the effect of balanced fertilization of soybean in different agricultural ecological regions of Heilongjiang Province[J]. Soybean Science, 2015, 34(6): 1029–1038

[7] 刘建国, 李俊华, 翟孟茹, 等. 奶花芸豆种植密度与施肥量优化组合模式的研究[J]. 西北农业学报, 2005, 14(4): 57–60
Liu J G, Li J H, Zhai M R, et al. Study on optimum model of planting density and fertilizing for *Phaseolus vulgarisl*[J]. Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica, 2005, 14(4): 57–60

[8] 李俊华, 刘建国, 冯玉龙, 等. 施肥量对奶花芸豆产量效应和养分吸收的影响[J]. 土壤, 2007, 39(6): 1004–1008
Li J H, Liu J G, Feng Y L, et al. Effect of fertilization amount on *Phaseolus vulgarisl* yield and nutrient absorption[J]. Soils, 2007, 39(6): 1004–1008

[9] 宋谨同, 赵宏伟, 杨亮, 等. 氮肥用量对芸豆氮肥利用率和产量影响的研究[J]. 农业现代化研究, 2013, 34(6): 749–753
Song J T, Zhao H W, Yang L, et al. Effect of nitrogen application on nitrogen use efficiency and yield of kidney bean[J]. Research of Agricultural Modernization, 2013, 34(6): 749–753

[10] 杨启, 马茂亭, 赵丽平, 等. 不同施氮处理对芸豆产量和品质的影响[J]. 北方园艺, 2014(13): 176–180
Yang Q, Ma M T, Zhao L P, et al. Effect of different nitrogen fertilizer treatments on yield and quality of greenhouse kidney bean[J]. Northern Horticulture, 2014(13): 176–180

[11] 畅建武, 郝晓鹏, 王燕, 等. 红芸豆氮磷钾肥效试验研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(15): 108–113
Chang J W, Hao X P, Wang Y, et al. Fertilizer efficiency experiment of nitrogen phosphorus and potassium on red kidney bean[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(15): 108–113

[12] 乔秀平. 不同施氮水平对芸豆产量的影响[J]. 山西农业科学, 2014, 42(7): 694–696
Qiao X P. Effects of nitrogen fertilizer application rates on yield of kidney bean[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2014, 42(7): 694–696

[13] 龙静宜. 食用豆类种植技术[M]. 北京: 金盾出版社, 2002: 164–166
Long J Y. Edible Beans Planting Technique[M]. Beijing: Shield Press, 2002: 164–166

[14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000
Bao S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000

[15] 高运青, 徐东旭, 尚启兵, 等. 华北高寒区施肥量对芸豆产量和经济效益的影响[J]. 河北农业科学, 2012, 16(8): 28–30
Gao Y Q, Xu D X, Shang Q B, et al. Effects of fertilization rate on yield and economic benefit of kidney bean in cold plateau of north china[J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2012, 16(8): 28–30

[16] 毕远林. 大豆干物质积累与氮、磷、钾吸收与分配的研究[J]. 大豆科学, 1999, 18(4): 331–335
Bi Y L. Study on accumulation of dry matter and absorption and distribution of nitrogen, phosphorous and potassium in soybean[J]. Soybean Science, 1999, 18(4): 331–335

[17] 刘克礼, 高聚林, 王立刚. 大豆对氮、磷、钾的平衡吸收动态的研究[J]. 中国油料作物学报, 2004, 26(1): 51–54
Liu K L, Gao J L, Wang L G. Study on dynamic balance assimilation of N, P and K in soybean[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2004, 26(1): 51–54

[18] 赵婷婷, 冯光明, 刘树欣. 红小豆氮磷钾积累与分配规律的研究[J]. 河北农业大学学报, 2000, 23(3): 16–19
Zhao T T, Feng G M, Liu S X. The study on accumulation and partitioning of nitrogen phosphorus and potassium in adsuki bean[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 2000, 23(3): 16–19

[19] 宋海星, 李生秀. 玉米生长量、养分吸收量及氮肥利用率的动态变化[J]. 中国农业科学, 2003, 36(1): 71–76
Song H X, Li S X. Dynamics of nutrient accumulation in maize plants under different water and N supply conditions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(1): 71–76